1Д

УДК 004.896

О.В. Даринцев
Институт механики Уфимского научного центра РАН, г. Уфа, Россия
ovd@imech.anrb.ru

Интеллектуальный модельный базис системы управления капиллярным микрозахватом

В статье рассматривается методика использования моделей микрозахвата, окружающей среды и поверхностных свойств материалов при построении интеллектуальной системы управления капиллярного захватного устройства. Предлагается на основе модельных данных построить контур коррекции сигнала управления с нечеткого регулятора, использующего косвенные данные для реконструкции текущего состояния системы «захват-микрообъект», что позволит увеличить быстродействие микрозахвата, обеспечить надежное удержание и гарантированное отпускание микрообъектов.

Введение

Манипуляция с микрообъектами требует нестандартных подходов не только при конструировании захватных устройств, но и при синтезе систем управления. Так, очень часто при создании микрозахватов используются нетипичные эффекты, оригинальные типы приводов и т.д. [1-3]. Другой причиной, побуждающей строить уникальные системы управления, является сильное влияние адгезионных проявлений при контакте захватываемых объектов с инструментом: сил Ван-дер-Ваальса, электростатики, сил поверхностного натяжения. Необходимость построения модельного базиса обусловлена отсутствием датчиков, имеющих сверхкомпактные размеры и позволяющих получить информацию о микровзаимодействиях, поведении микрообъектов при контакте с инструментом или поверхностью.

Целью данной работы является разработка методики, позволяющей использовать модельные данные при работе системы управления капиллярным микрозахватом для компенсации информационной недостаточности.

Построение модельного базиса

Капиллярный микрозахват, для которого проводится построение системы управления, является технической реализацией полученного патента [4] и представляет собой экспериментальный стенд для изучения поверхностных свойств наноструктурных материалов, а также полигон для проверки работоспособности интеллектуальных систем управления. В условиях высокой влажности воздуха или при работе со смачиваемыми микрообъектами необходимо учитывать капиллярные силы, вызванные образованием жидкой (межфазной) пленки. Природа этих сил определяется межмолекулярными взаимодействиями и структурой поверхностного слоя контактирующих объектов. Когда микрообъект соприкасается с межфазной пленкой на поверхности рабочего органа или подложки, происходит изменение формы пленки – образуется «шейка» (рис. 1а). Вода смачивает поверхность рабочего органа, так как согласно соотношению Неймана энергетически более выгоден контакт жидкости с материалом поверхности, чем с воз-

духом. Искривленная поверхность «шейки» будет стремиться к выпрямлению, что возможно только за счет отпускания микрообъекта, поэтому возникает сила притяжения между микрообъектом и рабочей поверхностью захвата.

Определим величину капиллярной силы. Пусть радиус микрообъекта намного превосходит все остальные характерные размеры задачи. На рис. 1б) введены следующие обозначения: D – расстояние «рабочий орган-образец»; d – «глубина погружения»; h – толщина пленки; ρ_1 – меньший радиус кривизны жидкой поверхности; ρ_2 – радиус площадки соприкосновения поверхности с жидкостью; θ – краевой угол для линии раздела трех сред.

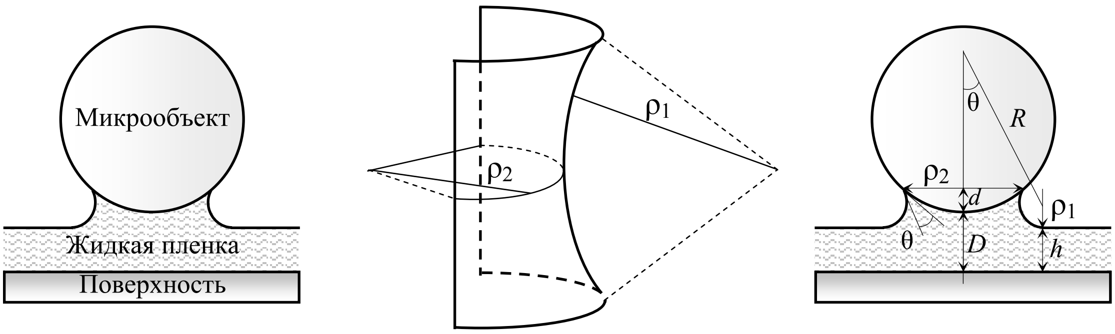
Согласно формуле Лапласа давление в жидкости будет меньше атмосферного на величину (рис. 1в)

$$\Delta p = \gamma\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) \approx \frac{\gamma}{\rho_1},\ \rho_1 << \rho_2,$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения.

Это давление приложено к поверхности соприкосновения рабочего органа с жидкостью на площади $\pi \cdot \rho_2^2 \approx 2 \cdot \pi \cdot R \cdot d$. Тогда сила притяжения $F_{кап}$ микрообъекта к рабочему органу, обусловленная капиллярным эффектом, составляет

$$F_{кап} = P \cdot 2\pi \cdot Rd = 2\pi \cdot Rd \cdot \frac{\gamma}{\rho_1}.$$



а) б) в)

Рисунок 1 – Силы поверхностного натяжения между микрообъектом и поверхностью (рабочий орган или подложка): а) образование «шейки»; б) пояснение к формуле Лапласа; в) расчет капиллярной силы

Как видно из рис. 1б) – $\rho_1 \cdot \cos\theta + \rho_1 = D + d - h$. Таким образом,

$$F_{кап} = \frac{2\pi \cdot R \cdot \gamma \cdot (1 + \cos(\theta))}{1 + (D - h)/d}.$$

Если можно пренебречь толщиной межфазной пленки (h = 0), то справедливо равенство $2 \cdot \rho_1 \cdot \cos\theta \approx D + d$, и формула упрощается до

$$F_{кап} = \frac{4\pi \cdot R \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{1 + D/d}.$$

Чтобы не заострять внимание на вычислении d, для предварительной оценки воспользуемся максимальным значением капиллярной притягивающей силы, которое достигается при D = 0. При этом из формулы исчезает неизвестный параметр d:

$$F_{кап} = F_{max} = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \gamma \cdot \cos\theta.$$

Если принять, что краевой угол мал, то есть cos θ ≈ 1, то формула для оценки капиллярной силы принимает следующий вид:

$$F_{кап} = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \gamma .$$

Для капли жидкости, лежащей на твердой поверхности (рис. 2а), контактный угол θ_C определяет соотношение натяжений на границах раздела фаз жидкость-воздух, поверхность-воздух и жидкость-поверхность. В равновесии это натяжение удовлетворяет уравнению Юнга:

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LA}\cos\theta_C, \qquad 0 < \theta_C < \pi .$$

Например, при $\gamma_{SA} > \gamma_{SL} + \gamma_{LA}$ энергия жидкости приводит к ее растеканию по поверхности с углом $\theta_C=0°$, как показано на рис. 2б). На рис. 2в) показано, как капля жидкости образует «мост захвата» между двумя жесткими прямоугольными пластинами с радиусом вписанной окружности r_0 и расположенными друг от друга на расстоянии $z << r_0$. Если жидкость не растекается по пластине, радиус капли удовлетворяет условию $r_l < r_0$. Энергия натяжения капли (поверхностная энергия) может быть найдена по следующей формуле:

$$U_S \approx 2 \cdot [A_{SA}\gamma_{SA} + A_{SL}\gamma_{SL}] = 2\pi \cdot [r_0^2\gamma_{SA} - \gamma_{LA} r_l^2 \cdot \cos\theta_C],$$

где A_{SA} и A_{SL} – площади границ раздела фаз поверхность-воздух и поверхность-жидкость. В уравнениях не учитываются сложные явления образования менисков в некоторых областях границы жидкость-воздух, когда площадь границы находится в пределах $A_{LA} << A_{SL}$ или $2\pi r_l z << 2\pi r_l^2$. Если $\theta_C = 0°$, состояние жидкости неустойчиво (рис. 2г), ее энергия может быть вычислена как

$$U_S = 2 \cdot [A_{SL}\gamma_{SL} + A_{LA}\gamma_{LA}] = 2\pi \cdot [r_0^2(\gamma_{SL} + \gamma_{LA}) - \gamma_{LA} r_l^2].$$

В общем виде выражение для поверхностной энергии жидкости записывается в виде

$$U_S = C(\theta_C) - 2\gamma_l \cos\theta_C \pi\, r_l^2, \qquad (1)$$

где $\gamma_l = \gamma_{LA}$ и $C(\theta_C)$ – константа. Если нижняя пластина неподвижна (рис. 2в), то в состоянии равновесия к верхней пластине будет приложено тяговое усилие или сила сцепления F. Если расстояние между пластинами изменяется на величину dz, то и энергия натяжения жидкости изменится на величину dU_S. Сила F и поверхностная энергия связаны соотношением

$$F = -\left(\frac{dU_S}{dz}\right) = -\left(\frac{dU_S}{dr_l}\right) \cdot \left(\frac{dr_l}{dz}\right). \qquad (2)$$

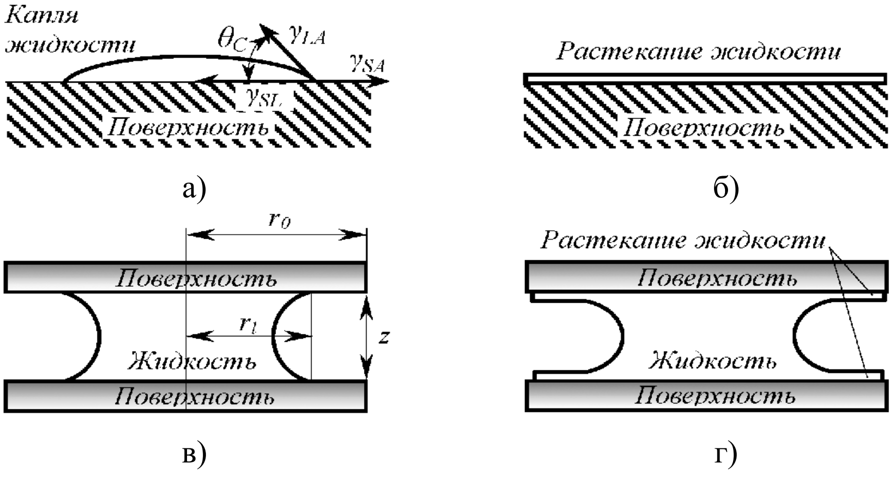


Рисунок 2 – Силы поверхностного натяжения в динамике

С учетом того, что объем капли $V_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot z$ и $\frac{dr_1}{dz} = -\frac{r_1}{2z}$, подставляя (1) в (2), получаем $F = \frac{-2 \cdot \pi \cdot \gamma_1 \cdot \cos\theta_C \cdot r_1^2}{z}$. Тогда капиллярное давление q, оказываемое на поверхность пластины, может быть найдено как

$$q = -\frac{F}{\pi \cdot r_1^2} = \frac{2 \cdot \gamma_1 \cdot \cos\theta_C}{z}.$$

Это давление, пропорциональное величине $\gamma_1 \cos\theta_C$, является адгезионным натяжением. Давление q изменяется нелинейно в зависимости от расстояния z и оно либо притягивает поверхности тел, либо отталкивает в зависимости от знака $\cos\theta_C$.

Таким образом, при условии, когда доминирующими являются силы поверхностного натяжения, а влиянием других составляющих адгезии можно пренебречь, уравнения динамики между сферическим микрообъектом и основанием капиллярного захватного устройства можно записать в следующей форме:

$$m\ddot{z} + kz = -\frac{2\pi \cdot \gamma_1 \cdot \cos\theta_C \cdot r_1^2}{z},$$

где kz – вязкое сопротивление межфазной пленки; m – масса микрообъекта.

Моделирование полученных зависимостей позволяет построить набор тренировочных шаблонов, которые вместе с экспериментальными данными являются исходной информацией для обучения нейросетевого предиктора. Для обучения предиктора также используются текущие данные с датчиков и сигнал управления, генерируемый системой управления на базе нечеткого регулятора (рис. 3).

Предлагаемый подход к построению интеллектуального модельного базиса системы управления является технической реализацией концепции построения систем управления микророботами и комплексами с включением в сферу управления внешней среды (рис. 4) [5].

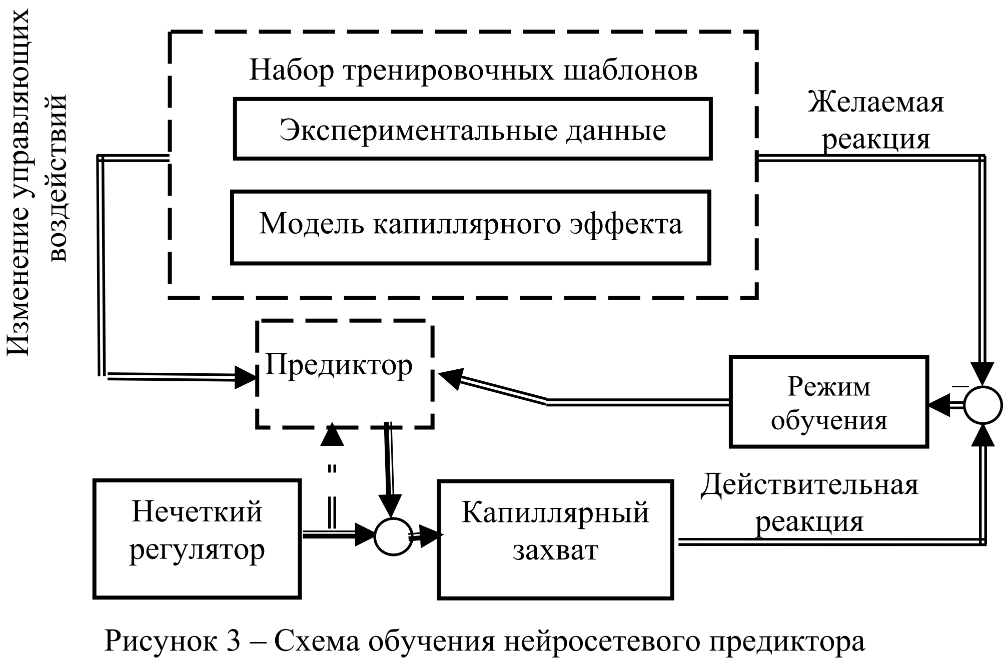


Рисунок 3 – Схема обучения нейросетевого предиктора

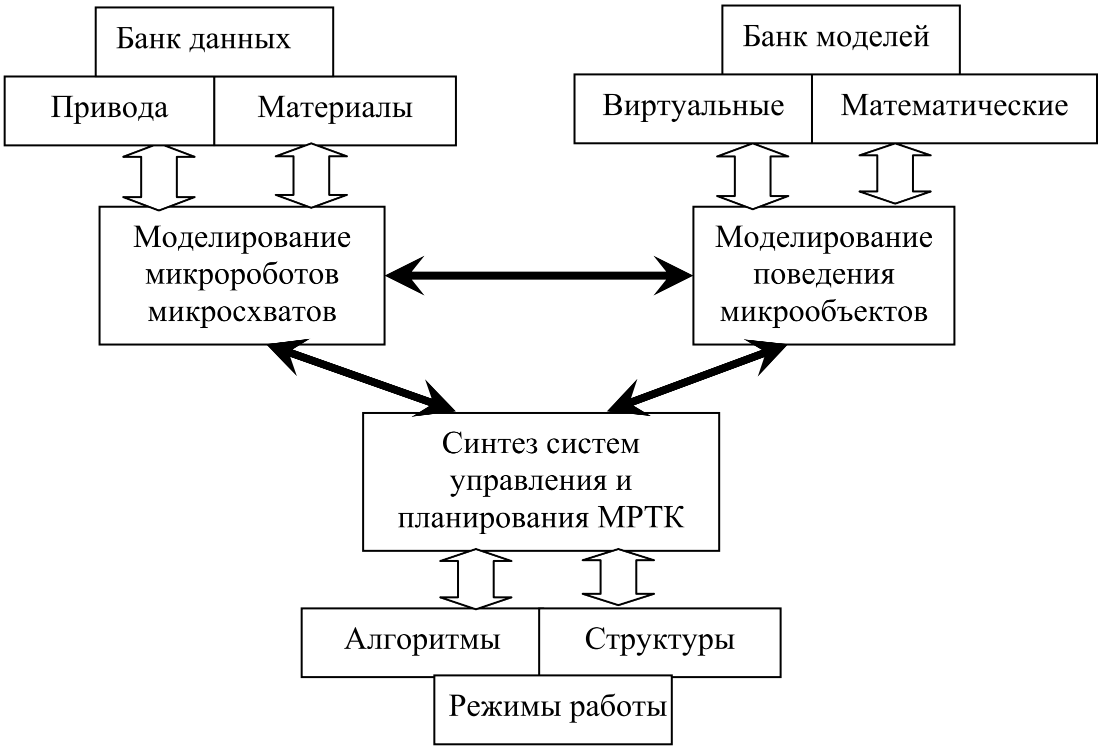


Рисунок 4 – Концепция построения интеллектуальных систем управления микророботами и микросхватами

Экспериментальная проверка работоспособности

Для проверки предлагаемой методики построения интеллектуальной системы управления капиллярного микрозахвата были изготовлены прототип устройства и лабораторный стенд, обеспечивающий требуемые параметры рабочей среды (рис. 5).

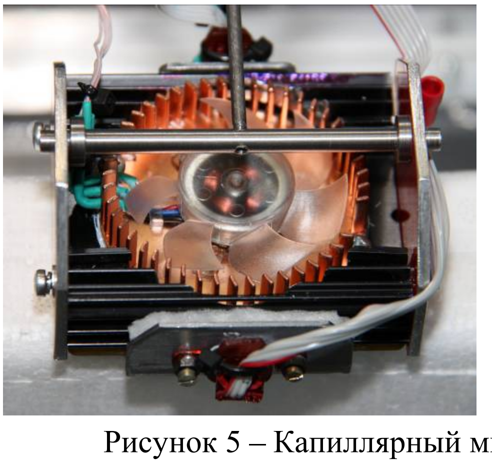




Рисунок 5 – Капиллярный микросхват (слева) и лабораторный стенд

Для работы микрозахвата необходимо обеспечить появление жидкой пленки на рабочей поверхности, при этом нежелательно образование капель. Поэтому в качестве рабочей поверхности была использована металлическая пластина как материал с высокой смачиваемостью, что гарантирует при конденсации пара образование тонкой пленки воды, а также позволяет быстро и эффективно очищать поверхность от посторонних веществ. В качестве охлаждающего элемента использовался серийный термоэлектрический модуль ТЭМ, работа которого основана на реализации эффекта Пельтье.

Для обеспечения необходимых температуры и влажности в состав стенда входят вентиляционная система на базе двух управляемых вентиляторов и пьезоиспаритель с доработанной системой управления.

В качестве источников информации о рабочей среде использовались 4 датчика температуры: температура «холодной» и «горячей» поверхностей схвата, гигрометрическая пара датчиков, позволяющих получать температуру и влажность среды. На основе этой информации строилась система управления на базе нечетких алгоритмов, выходные сигналы которой задавали скорость и направление вращения вентиляторов, а также величину тока, протекающего через ТЭМ, то есть степень охлаждения рабочей поверхности. Необходимая температура вычислялась на основе таблицы точки росы.

Эксперименты проводились на основе операции захвата металлической шайбы диаметром 28,5 мм и толщиной 1,25 мм, при этом производились замеры времени, необходимого для образования пленки на поверхности захвата, достаточной для удержания объекта. Попытки захвата проводились с интервалом в 1,5 – 2 с, что позволяет косвенно оценить скорость образования конденсата с точностью, достаточной для обучения нейросетевого предиктора. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные; время, необходимое для осуществления операции в с

	Нечеткий регулятор		Нечеткий регулятор с каналом парогенератора		Нечеткий регулятор с нейросетевым предиктором	
	Захват	Отпускание	Захват	Отпускание	Захват	Отпускание
Прямое включение ТЭМ	185	1800	95	1200	35	600
Прямое включение ТЭМ с инверсией при отпускании	185	300	95	210	35	150
Прямое включение ТЭМ с инверсией при отпускании и дополнительной вентиляцией	185	180	95	145	35	65

Затем для ускорения процесса образования конденсата на холодной поверхности без увеличения тока, протекающего через ТЭМ, и более глубокого охлаждения рабочей поверхности в систему управления был включен пьезоиспаритель. К выходным сигналам нечеткого регулятора добавился сигнал управления пьезогенератором в виде величины скважности ШИМ, что позволило управлять скоростью генерации водяного пара, подаваемого с помощью встроенного вентилятора в заданное место рабочей зоны манипулятора. Этот вариант нечеткой системы управления стал основой для синтеза гибридного варианта со встроенным нейросетевым предиктором.

Как видно из приведенных данных (табл. 1), значительное ускорение операции захвата-отпускания возможно при использовании инверсного режима ТЭМ, когда меняется направление протекающего через элемент тока. При этом нагрев рабочей поверхности происходит намного быстрее, чем при простом отключении питания. Эффективность использования нейросетевого предиктора подтверждается малыми периодами времени, необходимыми для захвата изделия и его последующего отпускания. Если время, необходимое для удержания, можно значительно сократить за счет увеличения влажности рабочей среды или увеличения скорости парогенерации, то проблема с сокращением времени, необходимого для отпускания, более сложна. Это объясняется тем, что при захвате существенное значение имеет площадь поверхности объекта и

(или) пленки жидкости, вступающих в контакт, а при отпускании – площадь боковой поверхности жидкой капли. Поэтому для решения этой проблемы необходимы конструктивные решения.

Интересные данные были получены при захвате изделий, изготовленных из наноструктурных металлических материалов, но эти данные в статье не приведены, так как требуют дополнительной экспериментальной проверки и построения адекватной математической модели.

Выводы

Изложенная в статье методика построения интеллектуальной системы управления капиллярным микрозахватом отличается от классического подхода, так как вместе с управлением нелинейным объектом производится активное управление внешней средой. Метод может быть использован при реализации систем управления и другими микроробототехническими системами, так как при их функционировании взаимодействие агентов в комплексе «микрообъект-микроробот-внешняя среда» претерпевает значительные и трудно предсказуемые изменения. Эффективность предлагаемой методики подтверждена экспериментальными данными, полученными на полунатурном лабораторном стенде. Однако есть возможность значительно улучшить характеристики микрозахвата при проведении дальнейших исследований.

Благодарность

Автор выражает признательность за финансовую поддержку проводимых исследований ОЭММПУ РАН (Программа №15 фундаментальных исследований) и РФФИ (гранты 08-08-97021-р_поволжье_а, 08-08-00774-а).

Литература

1. Даринцев О.В. Моделирование работы микроманипуляционного устройства, изготовленного с использованием наноструктурных материалов / О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 11. – С. 19-23.
2. Даринцев О.В. Система управления и конструкция капиллярного микрозахвата / О.В. Даринцев // Материалы XX Междунар. науч.-техн. конфер. «Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы (ЭР-2009)». – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 335-337.
3. Даринцев О.В. Манипуляционные микроробототехнические системы и проблемы производства гибридных МЭМС / О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – № 2. – С. 38-44.
4. Даринцев О.В. Капиллярный микрозахват с обратной связью / О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов // Патент 2261795 RU МПК[7] B 25 J 7/00, 15/00; Опубл. 10.10.2005, Бюл. № 28.
5. Darintsev O.V. Design Prediction Block for Control System of the Micromanipulator / O.V. Darintsev, A.B. Migranov, T.F. Bakirov // Proceedings of the Workshop (CSIT'2007), (Krasnousolsk, Ufa, September 13 – 16, 2007). – Vol. 2. Ufa State Aviation Technical University, 2007. – P. 171-174.

О.В. Дарінцев

Інтелектуальний модельний базис системи управління капілярним мікрозахватом

У статті розглядається методика використання моделей мікрозахвату, довкілля і поверхневих властивостей матеріалів при побудові інтелектуальної системи управління капілярного захватного пристрою. Пропонується на основі модельних даних побудувати контур корекції сигналу управління з нечіткого регулювальника, що використовує непрямі дані для реконструкції поточного стану системи «захват-мікрооб'єкт», що дозволить збільшити швидкодію мікрозахвату, забезпечити надійне утримання і гарантований відпуск мікрооб'єктів.

O.V. Darintsev

Intellectual Modeling Basis for a Control System of Capillary Microcapture

In the article the technique of use of models of microcapture, environment and superficial properties of materials is considered at the construction of an intellectual control system capillary capture devices. It is offered on the basis of modeling data to construct a correction circuit of a steering signal from the fuzzy control which uses the indirect data for reconstruction of a system current condition «capture-microobject» that will allow to increase speed of microcapture, to provide reliable deduction and guaranteed detachment of microobjects.

Статья поступила в редакцию 23.12.2010.